

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25330191

研究課題名(和文) 音声・音楽の統合処理による新しい人工内耳の情報処理方式の研究

研究課題名(英文) Study on information processing strategy for a new cochlear implant that integrates speech and music

研究代表者

北澤 茂良 (KITAZAWA, Shigeyoshi)

静岡大学・情報学部・名誉教授

研究者番号：00109018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：人工内耳装用者(CIR)のための音楽聴取支援装置として個人ごとの移調と速度調整の特性を学習獲得できる「懐名歌」を開発し、CIRの内観報告を多数得た。これを生かして人工内耳の音響シミュレーションを開発し、人工内耳音階の効果を確認し、音楽聴取できる人工内耳の可能性を検討した。CIRが楽しめる音楽を提供するために、知名度、年代、主旋律の音程、リズム、などを考慮して15曲を選択し、音楽訓練を受けた女声・男声・口笛が演奏した。曲楽は、刺激電極数が最大化されるように移調を行った。

研究成果の概要(英文)：When we proposed a music transposition method by the cochlear implant scale corresponding to the analysis filter of the cochlear implant and it was guessed that better scales for hearing differ for every CIR(Cochlear Implant Recipient). We developed a system for music listening support system for CIR named "KaiMeiKa" (nostalgic good songs) which enabled to adjust the transposition process to a cochlear implant scale for each CIR by themselves and by the systematic learning process. Based on CIR reports, we developed acoustic simulations of cochlear implant to show the effects of the cochlear implant scale, then proceeded to the design of a new cochlear implant that enables music listening. We prepared a set of 15 songs that are enjoyable for CIR considering familiarity, ages epidemic, musical intervals of the main melody, and rhythms. Those songs are played by female and male and whistle singers who are trained professional skills, and are played with the transposition.

研究分野：音声聴覚情報処理

キーワード：人工内耳 音楽聴取支援装置 人工内耳音階 MATLAB 歌唱 シミュレーション 懐名歌

## 1. 研究開始当初の背景

人工内耳は聴力を失った患者の蝸牛内に電極を埋めこみ、体外の音声変換プロセッサより電極刺激信号を送ることによって聴力回復する医療機器である。人工内耳は1980年代に多チャンネル型が開発され、音声会話が可能になり、実用化されたが、当初は母音のみが認識可能で子音の聴取が困難であった。その後、いくつかの方式が開発され、技術的には、電極の刺激頻度を徐々に上げることによって、音声会話の性能を向上させてきた。

この間に明らかになってきた人工内耳の問題点は、言語獲得後に失聴した多くは成人にとっては現行の人工内耳はかなり(80%くらい)の音声言語聴力の回復が得られることもあるが、音楽聴取に関しては殆ど無理であるため、装用者は人工内耳装用後には音楽聴取をあきらめる覚悟が求められている。今日、幼児に装用した場合に、多くは先天聾で、早期発見し、1乃至2歳のころに埋め込むことによって、若干の遅れはあっても、ほぼ健聴児と同程度の言語獲得が可能となり、聾教育に革命をもたらしているが、音楽聴取に関しては健聴児と大きな差があり、学校生活や教育上の大きな問題となっている。

我々は人工内耳装用者(CIR)が楽しめる音楽を作成する方法を研究してきた。その結果明らかになったのは、成人の中途失聴者は、健聴時の記憶にある音楽であれば人工内耳の特性に合わせた曲の変換(これを人工内耳音階と呼んでいる)を行えば、より良く聴取可能になる。しかしながら、記憶にない曲や最近の新しい曲(例えば「千の風になって」)を聴取することは殆ど不可能である。また、先天聾の幼児にとっては音楽を学習することが極めて困難である。

人工内耳で音楽聴取のための様々な試みが行われてきた。根本的な問題解決には、音楽聴取可能な人工内耳の音響プロセッサの処理方式を開発しなければならない。現状では有力な方法は全く提案されていない。

## 2. 研究の目的

研究代表者は長年人工内耳の音声処理方式の開発経験を集大成して、音楽聴取可能な人工内耳の音響処理方式を早期に開発する。

(1) 根本的に新しい音楽聴取可能な人工内耳を開発する。現行の人工内耳はVocoder音声通信技術に基づいていたので音楽通信は盲点となっていた。現行人工内耳による韻律獲得は200Hz程度に過ぎないが、時間周波数分解能を改善して、10kHzのピッチが聴取できる両耳装用で音階伝達可能な人工内耳を開発する。

(2) 既装用者のQOL改善を重視して、既装用の人工内耳を利用することも前提とする。

(3) 連携研究者・研究協力者が本研究の成果によって、音楽聴取可能な人工内耳の可能性を確信して、本研究が我が国において新しい人

工内耳の開発体制が構築される礎となる。

## 3. 研究の方法

(1) 人工内耳による音楽聴取の機構を推定し、音楽伝達できる人工内耳として高時間解像度波形圧縮の処理方式を開発するため、音響シミュレーションする。

研究代表者らは優れた音声認識性能を有した人工内耳方式を提案し、臨床試験を行った。従来の人工内耳はボコーダ(Vocoder)方式であったが、我々は波形符号化を導入した。臨床試験において本方式は言語聴取に改善が見られたが、メロディ聴取に関しては従来機と差はなかった。周波数・時間分解能に関しては大きな違いは無かった。音声情報と音楽情報の時間・周波数空間の解像度が大幅に異なり、音声においては基本周波数の解像度が良いが、音楽においては、全音階の解像度が要求されている。音楽聴取可能な人工内耳の開発に向けた基礎的検討として、波形コード化方式の音響シミュレーションを行う。スペクトルコード化方式と波形コード化方式を音楽聴取に関して優劣を比較する。

(2) 従来方式の人工内耳で聴取できる音楽を生成するため人工内耳音階を活用する。我々は人工内耳で聴取できる音楽を生成するため人工内耳音階を着想し、その効果を確認した。中途失聴の成人には有効であるが、先天聾の幼児には効果は少なかった。現行人工内耳で直ちに音楽聴取に効果を得ることが出来るので、本方式を更に改善する。個人差の問題を明らかにし、個人への適応を行う。

人工内耳を通じた音楽聴取時、楽曲中の各音は個々のCIRの仮想的な音階識別特性(仮想的なフィルタを想定する)を通して聴取されるとすると、この時、複数の音が同一のフィルタ内に収まる音階の違いをCIRは識別できず、音楽を十分に楽しむことができない。しかし中途失調のCIRであれば、失調前の記憶と結びつけることで識別を補って音楽を認識することができる。そこで、CIRが失調前の記憶と結びつけやすいように、特定の楽曲中の主旋律構成音が同一フィルタで重複しないよう曲全体を移調する拡張人工内耳音階を用いることで多くの被験者が刺激情報の変化に気づき、音楽聴取の改善が得られる。

これまでの研究で、音楽が聴取し易くなる音程(キー)、音色、テンポが個人ごとに楽曲ごとに異なるため、キーについて人工内耳の電極の刺激パターンのCIRごとの好みを測定し、異なる楽曲についても類似のパターンを予測し調整する「個人差変換」を開発する。また、CIRが音程を識別できるのは人工内耳のフィルタとは必ずしも対応してないことから、個別にCIRの音階識別特性を測定し、これに基づいて楽曲のキーを設定することによって、各CIRに最も適した条件で音楽を聴取できるように設定できるシステムを開発する。

(3)音響シミュレーションによって有望な方式を探索し、その効果を確認する。音声音楽環境音の効率的な符号化方式の開発を行う。音楽聴取可能な人工内耳の開発に向けた基礎的検討として、全音階に対応する正弦波での音響シミュレーション結果（既存のシミュレータを活用する。）の音高を測定し、人工内耳のパルスレートとチャンネル数を変数として明らかにする。時間分解能 10kHz が理想だが、期間内では 2 kHz(7C、0.50 ms)までを音響シミュレーションし、音楽品質が改善されることを確認する。これによって、現行の人工内耳で楽音として再現できる音階の範囲が限定されているために既存の演奏を音楽として聴取することは困難であり、音楽聴取できる人工内耳は性能を格段に向上させる必要があることを示す。

(4)人工内耳で聞き易い音楽を作成する。人工内耳装用者にとって直ちに効果がある音楽を提供する。CIR が研究協力を得るには、これまでの研究成果を分かり易い形で還元する必要がある。提示する音楽内容の質を高めることが、CIR の研究参加を推進するからである。研究結果で明らかになった技術的手法に基づいて、人工内耳装用者のための音楽を一流演奏家によって生成し、その効果を確認する。

#### 4. 研究成果

(1)音楽聴取に関して、スペクトルコード化方式と波形コード化方式の違いを音響シミュレーションで比較する。ピアノ音源のチューリップ、口笛音源のチューリップ、ジャズを比較したところ、ピアノ音源のチューリップではスペクトルコード化方式の評価が高かった。これは波形コード化方式では選択チャンネルに偏りが出来たためである。口笛のチューリップとジャズでは波形コード化方式の評価が高かった。ピアノ音源のような単純な音では波形コード化方式のパルス選択戦略には改善の余地がある。一方、口笛やジャズのような複雑な音源では波形コード化方式が有効となった。

(2)従来方式の人工内耳で聴取できる音楽を生成するために人工内耳音階を着想し、その効果を確認している。人工内耳音階を活用して、現行人工内耳で直ちに音楽聴取に効果を得ることが出来るので、本方式を更に改善する。個人差の問題を明らかにして個人への適応を行う。

CIR のための音楽聴取支援装置として個人ごとの移調と速度調整の特性を学習獲得できる「懐名歌」を開発し、人工内耳装用者の会で実演し、大好評であった。もっと使いたい 42%、役に立つ 33%。その要因として、小型磁気ループを「懐名歌」1 台ごとに接続して磁界を人工内耳の受信コイルに直接音楽を伝えたことである。装置の近傍 2m 以内は明瞭に聴取できた。口笛生演奏は大変良かった 75%、良かった 6%である。管楽器音は不

快感を持つという従来の知見からは予想外であった。使い方が分かり難いという意見から今後の改善の方向が見えた。

より多くの CIR に Web を通じて音楽聴取を体験していただくために、「懐名歌」の Web 版を作成した。従来、面接して装置を操作していたが、自宅での利用を実現して地理的・時間的問題を解決するためである。これによって Web ブラウザ上で自由に利用可能となった。装用者の内観報告を多数得ることによって人工内耳による聴取モデルの構築及び音響シミュレーションの構築に有効に生かすことができる。

個人差の問題を明らかにした。個人への適応を行う「個人差変換」を開発し、ピアノとギターの音源について実験を行った。懐名歌の使用経験から、被験者が好むキーが楽曲ごとに異なることや、楽曲が刺激する人工内耳チャンネル数を最大化する移調を行ったときの評価が被験者ごとに異なることから、CIR ごとに聴き易いと感じる電極刺激パターンに個人差がある。CIR ごとに聴き易いと感じる電極の刺激パターンを学習し、CIR が好むと予想した刺激パターンと類似のパターンになるように変換する手法をここでは「個人差変換」として実現した。失聴前の記憶と結び付け易い刺激パターンともなる。3、4 曲程度の累積重みを学習することで個人差に基づいた楽曲変換が可能である。11 名の被験者で 80%の楽曲について個人差変換した方が聴き易いという結果が得られた。

個人差変換では音高の識別を人工内耳のフィルタに対応付けていたが、実際には製造者・機種・調整・個人の感覚によって異なるので個人ごとの「音階識別特性」を測定し、これに基づいて音程の変換を行って、最も有効な変換を求めた。ピアノとギターを音源として 2 音聴き比べで音高判定を行った。被験者自身が気付かない有効な変換を発見することが出来た。この特性は個人ごとに固有で、時期が異なっても安定している。被験者の負担は大きいですが、音楽聴取中に音階識別特性を調査できれば有効である。

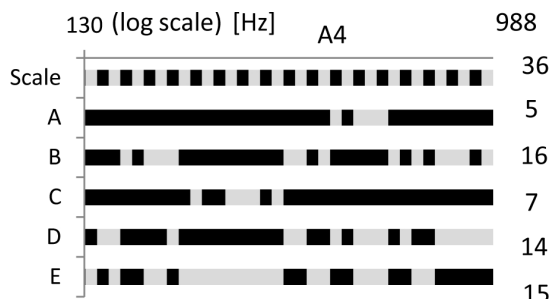


図 1 ピアノ音源で音階識別特性を測定した結果

A、B、C、D、E、5 名の被験者 CIR が違う音と識別したピアノ音源の識別実験の結果を図 1 に示す。グラフは横軸が周波数 [Hz] の対数軸で、CIR が同じ音であると判断した周波数帯域毎に色分けを行ったグラフであ

る。Scale 軸は全音階の範囲を示す。図中の A4 は音階(Scale)上で A4(440Hz)の音の位置を示す。またグラフ右側の数字は被験者の識別音数を示す。結果から特に被験者 B、D、E は聞こえの良い CIR であるため識別できている音数が多い。A、C は識別できている音数にそれほど差がないが、ピアノ音源では A は高音域の識別がよく、C は低音域の識別がよい。

よって、CIR ごとに楽曲の調整を変えることが極めて有効である。

(3)正弦波による音階 G1 から D#9 を 0.5 秒ごとに生成した。これをグラナダ大のシミュレータ ci\_sim に通した。得られた人工内耳のシミュレーション音から、入力の音階に対する出力の音階を求めた。オクターブの違いは無視して、正しい音階が得られる範囲を明らかにした。シミュレータのチャンネル数を 8、12、15、22、50 とパルスレート(PPS)を 1k、2k、5k、8k、10k と変えた。結果を表 1 に示す。各チャンネル数と PPS の組合せごとに、再現された音階の最低の音名と最高の音名を示す。特徴的なのは、チャンネル数によって最低音が決まること、チャンネル数が 15 の時に一番低い音が再現された。最高音は PPS と共に上昇する傾向があるが、22 チャンネルでは全く変化がなかった。

チャンネル数を増やすことの効果はあまり無く、PPS を増やすことが効果的である。8ch10kPPS において 5kHz までの周波数解像度が得られる見通しである。また、低周波数での歪の改善も課題になる。

表 1 チャンネル数とパルスレートの組合せと再現できた音階の範囲

PPS	Number of channels									
	8		12		15		22		50	
1000	F2	G3	D2	G3	C2	G3	D2	B3	D#2	B3
2000	D#2	F4	D2	F4	C2	F4	D2	B4	D#2	G4
5000	D#2	A5	D2	D5	C2	B4	D2	B4	D#2	B4
8000	D#2	F4	D2	D5	C2	C#6	D2	B4	D#2	B4
10000	D#2	A5	D2	D5	C2	E6	D2	B4	D#2	F5

(4)人工内耳装用者が楽しめるように歌唱による音楽を編成し演奏を収録した。我々は、CIR にとって聞きやすい音楽を作成する方法があることを見出して、これを人工内耳音階と名付けた。すなわち、聴取する楽曲の主旋律が人工内耳の異なる電極に対応させることができれば、CIR にとってのメロディ聴取が容易となる。実際上の経験からは、CIR にとって有効な音楽を提供するためには、1. CIR がよく知っている曲であること。2. 人工内耳は音声言語を伝達するので、歌手が歌った音源を用意するのが有効である。特に、一流の演奏家が有効である。

本研究では、上記の要因に配慮しつつ、CIR が楽しめる音楽を提供するために、一流の歌手が歌った音源を用意した。楽曲の知名度、年代別の違い、主旋律の音程の範囲、明るいリズム感、などを考慮して 15 曲を選択し、音楽訓練を受けた女声・男声・口笛に演奏し

ていただき、CD にまとめた。曲楽は、刺激電極数が最大化されるように移調を行った。収録曲の調と主旋律の範囲を表 2 に示す。

表 2 収録曲の調と主旋律の範囲

title	key	low	high	range
ぶんぶん	Fdur	C4	G4	7
森のくまさん	Cdur	C4	C5	12
揚げば尊し	Esdur	D4	D#5	13
かごめ	fmoll	E4	B4	7
大きな古時計	Gdur	E4	G5	15
荒城の月	cmoll	D4	F5	15
ふるさと	Gdur	D4	E5	14
赤いくつ	cmoll	C4	D#5	15
月の砂漠	cmoll	D4	F5	15
めだかの	Ddur	D4	D5	12
こいのぼり	Ddur	C4	C5	12
春よ来い	Gdur	C#4	C#5	12
茶摘み	Gdur	D4	D5	12
みかんの	Bdur	A#3	D#5	17
あんたがた	dmoll	E4	B4	7

上記のように調整した楽曲が、CIR にとって有効かどうか、一人目の歌手の収録から、数名の CIR に試聴報告を求めた。「普通にある音楽はいろいろな楽器の音が混ざり複雑であるため、また、人の声は小さく聴こえるため、ファイルや教科書を常に見ながらどこを歌っているのか確認しないといけなかったところが、この人工内耳用の音楽は、ピアノと声のみでシンプルであるから音階がとりやすく、人の声も聴きやすい。」とのこと。

数名の CIR からの試聴の回答は矛盾するが、表面の言葉の表現の背景を推測して解釈する必要がある。例えば、高音が一般には CIR には聞き良いが、高すぎれば(歌手の発声に無理があるため)不快に感じる。また、一般に女声が聞き良いのに、特定の歌手に依存して評価が変わる。この男声歌手は語尾が引き伸ばされているのが好感を持てたというなどである。男声歌手は日本の唱歌の研究を専門とし、日本語として分かり易く伝えるための研究成果を盛り込んでいただいたので、CIR の試聴でも歌詞がとても分かり易いと高評価であった。歌手の音楽表現の技量が直接評価に反映している。また、移調は基本的に意識されていない。つまり、健聴者の聴く音程の変化とは異なる聴き取りを行っているという推測される。口笛はすばらしいという意見と全く聞き取れなかったという意見があった。概ねねらい通りの効果を得ることが出来た。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 14 件)

北澤 茂良, 桐山 伸也, 人工内耳装用者が楽しめるように音楽を編成し演奏を収録する方法とその効果の研究、日本音響学会 2016 秋季研究発表会、2016.9.15、富山大学五福キャンパス(富山県富山市)

五福 3150).

石浦亮佑, 北澤茂良, 桐山伸也人工内耳装用者の音階識別特性に基づいた楽曲の移調とその効果について、日本音響学会 2016 春季研究発表会、2016.3.10、桐蔭横浜大学(神奈川県横浜市)。

北澤茂良, 石浦亮佑, 桐山伸也、人工内耳での音声・音楽の処理について、日本音響学会 2016 春季研究発表会、2016.3.10、桐蔭横浜大学(神奈川県横浜市)。

石浦亮佑, 北澤茂良, 桐山伸也、人工内耳装用者の音階識別特性を考慮した音楽聴取支援、日本音響学会 2015 秋季研究発表会、2015.9.18、会津大学(福島県会津若松市)。

北澤茂良, 石浦亮佑, 桐山伸也、人工内耳装用者の音楽聴取に関する楽器・和音・歌唱の効果、日本音響学会 2015 春季研究発表会、2015.3.16、中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区)。

石浦亮佑, 北澤茂良, 桐山伸也、楽曲を人工内耳装用者の好みに合わせる方法について、日本音響学会 2015 春季研究発表会、2015.3.18、中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区)。

北澤茂良、人工内耳装用者の音楽聴取に関する楽器・和音・歌唱の効果について第 59 回日本聴覚医学会総会・学術講演会、2014.11.27、海峡メッセ下関(山口県下関市)。

石浦亮佑, 北澤茂良, 桐山伸也、楽曲によって刺激される人工内耳電極を装用者の好みに合わせる方法とその効果について、日本音響学会 2014 秋季研究発表会、2014.9.3、北海学園大学(北海道札幌市)。

北澤茂良, 桐山伸也, 三浦幸一, 石浦亮佑、人工内耳装用者が聴取する音楽のシミュレーション、日本音響学会 2014 春季研究発表会、2014.3.11、日本大学理工学部(東京都千代田区)。

北澤茂良, 桐山伸也, 滑川翔太, 古川誠人, 牧内亮, 金森豊明、人工内耳装用者のための音楽聴取支援の研究、日本音響学会 2014 春季研究発表会、2014.3.11、日本大学理工学部(東京都千代田区)。

Shigeyoshi Kitazawa, The demonstration of the music listening support system for the cochlear implantees and the whistle performance in an ACITA Tokai branch organization meeting, The 9th Asia Pacific Symposium on Cochlear Implants and Related Sciences, 2013.11.29, Hyderabad International Convention Centre (Hyderabad, India)

北澤茂良、ACITA 東海支部設立総会における人工内耳装用者の音楽聴取支援装置の実演と口笛演奏、第 58 回日本聴覚医学会総会・学術講演会、2013.10.24、ホテ

ルブエナピスタ(長野県松本市)。

北澤茂良, 桐山伸也, 三浦幸一, 石浦亮佑、人工内耳による音楽聴取のシミュレーション、日本音響学会 2013 秋季研究発表会、2013.9.27、豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)。

北澤茂良, 桐山伸也, 滑川翔太, 古川誠人, 牧内亮, 金森豊明, 高田みずほ、ACITA 東海支部設立総会での人工内耳装用者のための音楽聴取支援装置の実演と口笛演奏、日本音響学会 2013 秋季研究発表会、2013.9.27、豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)。

〔その他〕

Web 版「懐名歌」

<http://minny.cs.inf.shizuoka.ac.jp/ishura/homeFile/index.html>

人工内耳装用者の音楽聴取用兼アンケートと聴取実験用の Web サイト

<http://www.ciscale.net>

「人工内耳で聴くための音楽 CD」の試聴サイト

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北澤 茂良 (KITAZAWA, Shigeyoshi)

静岡大学・情報学部・名誉教授

研究者番号: 00109018

### (2) 研究分担者

桐山 伸也 (KIRIYAMA, Shinya)

静岡大学・情報学部・准教授

研究者番号: 20345804

### (3) 連携研究者

松本 祐二 (MATSUMOTO, Yuji)

洗足学園音楽大学・音楽学部・講師

研究者番号: 40454160